

基于信道感知与监测的传感器网络 传输参数自适应调整方法

罗 成 谢维信 喻建平

(深圳大学 ATR 国防科技重点实验室, 广东深圳 518060)

摘 要: 针对预警系统中广域部署在偏远地区的传感器利用现有话音通信线路传输感知信息时, 信道具有时变的特征, 提出了一种基于信道感知与监测的传输参数自适应调整方法。该方法解决了连接线路在低信噪比下频繁掉线导致的传感器网络采集数据缺失与延时的问题。首先, 在数据包传输期间, 引入盲信噪比估计方法对信道质量进行感知, 通过加权滑窗平均估计结果得到信道质量周期监测的观测值。然后根据卡尔曼滤波原理建立离散化的传输参数自适应调整模型, 在保持链路连通状态下, 根据信道质量优劣变化自适应地调整传输速率与功率。最后, 实验表明, 对于野外布设传感器网络的时变信道, 该方法能有效保证信息传输的实时性与可靠性。

关键词: 传感器网络; 预警系统; 信道感知; 信噪比估计; 信道监测

中图分类号: TN915 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-0530(2011)09-1370-05

Adaptively Adjusting Method of Transmission Parameters in Sensor Networks Based On Channel Sensing and Monitoring

LUO Cheng XIE Wei-xin YU Jian-ping

(ATR Key Laboratory of National Defense Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: According to the time-varying characteristic of information transmission channel between sensors distributed on remote and wild regions, which transmit data by existing speech channel in Early Warning System, a new method is proposed for adaptively adjusting transmission parameters in sensor networks based on channel sensing and monitoring. The method solves the problems of the sensing data loss and delay caused by connecting lines frequently dropped in low SNR (Signal to Noise Ratio). Firstly, we adopt a blind SNR estimation algorithm to sensing the current channel quality during the packets transmission period and obtain the observed values by integrating the estimation results with weighted sliding-window. Then, we establish a discrete adjusting transmission parameter model based on Kalman Filtering principle, which can adaptively adjust the transmission rate and power according to the changes in the channel quality while maintaining the link. Finally, experiments results show, in condition of wild field emplaced sensor network's time-varying channel, this method can guarantee the information transmission's instantaneity and reliability.

Key words: Sensor Networks; Early Warning Systems; Channel Sensing; Signal to Noise Ratio Estimation; Channel Monitoring

1 引言

对于不同的传输介质、传输环境和传输频率, 信息传输的信道特性不同。在无线传感器网络中, 由于衰减、延迟、失真和电磁干扰等, 信道的传输速率、信道容量和误码率随时间变化。而对于通过有线接入的传感器网络^[1], 如预警系统中广域部署在偏远地区的雷达、观察哨、红外等多源信息组网系统, 往往利

用现有电信话音线路通信(基于成本及我国通信基础设施的实际情况考虑), 复杂的地域环境、天气变化和敌方电磁干扰等因素都会造成信道质量状态时变^[2]。现有通信模式是使用固定的符号速率与功率或者基于一次握手训练的参数, 如果该模式为低速模式, 对系统资源是巨大的浪费, 甚至会导致许多数据由于信道容量不够而拥塞丢失; 但如果是高速模式, 当传输环境一旦变恶劣, 信噪比减少到一定程度后, 数据帧便会出错

收稿日期: 2011 年 6 月 2 日; 修回日期: 2011 年 8 月 19 日

基金项目: 国防预研基金资助课题(51326030204); 国家重点实验室基金项目(9140C8004011007)资助课题; 深圳市科技计划项目(CXB200903090020A)

重传,待次数达到极限值,通信链路自动掉线,而重新建立链路需要8~10 s的时间,预警系统的监测数据将产生巨大延时,无法满足传感器网络对信息实时传输的需求^[1]。因此研究基于信道质量感知与监测的传输协议,根据信道质量的优劣变化使用传输参数自适应调整的策略和方法,是传感器网络实时信息汇聚和可靠传输的关键。

信道质量感知与监测的核心是获取时变的信道状态信息(Channel State Information, CSI),其方法是通过测量和跟踪信道质量参数来达到信道质量估计。信道质量估计方式有很多^[3],通常以接收误码率或信噪比作为其评价参数,其中尤其对SNR估计算法进行了比较多的研究,文献^[4]比较AWGN信道条件下的信噪比估计算法,并做出较好的总结。此外,信噪比的盲估计算法由于不需要已知传输序列,因此有着更吸引人的应用前景,如文献^[5]提出了利用接收信号自相关矩阵的奇异值分解进行信噪比估计的子空间方法,但巨大的运算量限制了它的应用范围。因此如何使信噪比的估计性能有明显的提高,而且运算复杂度降低到可以接受的程度,是信道质量估计的重要过程。

信道传输参数自适应调整方法根据信道质量估计的方法不同大致可分为两大类。第一类是基于信道质量参数统计的方法。发送端统计一段时间内发送数据的某些信息,如误帧率、ACK成功接收次数、吞吐量等,作为判断信道质量的依据,根据统计参数来选择合适的传输速率。如文献^[6]中, Jacobsmeier J M提出了一种自适应速率调整方法,节点根据一段时间内数据吞吐量,决定是否切换到更高或是更低的传输速率上去。针对无线传输信道, Kamerman A 等和 Lacage M 等分别提出了 ARF^[7](Automatic Rate Fallback), AARF^[8](Adaptive ARF),以及经过该系列算法通过节点分别统计已完成的连续成功传输和失败传输次数调整传输参数。这类方法对硬件没有特殊要求,因而实施简单,但该方法对信道状态变换反应比较慢,而且由于没有给出当前信道的最优速率,节点会在稳定信道中频繁尝试使用更高速率从而浪费系统资源。第二类是基于信道质量信息瞬时估计的方法,发送端通过瞬时估计信道的某一信息,如信噪比(SNR)、接收信号强度(RSS)或者误码率(BER),选择一个合适的传输速率,因而能够快速反应信道状态,如 M.S.Yee 等人提出的 AQAM^[9],通过对信道误码率的估计,利用自适应正交幅度调制方法,在信道较为理想的情况下,增大发送速率,以及近来 Camp, J 跨层实现的基于信噪比测量的传输参数调整方法^[10]。这种方法的缺点是精确地获取 SNR 值并不容易,会产生较大的测量误差,因此离散化的基于信道质量跟踪的传输参数调整模型能够更快地响应信道变化,如在文献^[11]提出的通过分帧的

信道信息的交换,实践证明了其在宽带局域网络中具有一定的环境自适应能力,然而该模型并未考虑信道状态的时间相关性,所以如果利用感知与监测相结合的方式获取信道质量参数,建立更为精确的传输参数模型,才能达到传输参数与信噪比变化相匹配。因此,到目前为止,针对信道状态时变野外布设的传输容量低的传感器网络,仍然没有实用的解决方案为其信息传输提供可靠高效的服务质量。

本文以预警系统中广域部署在野外的大型节点作为基本单元的传感器网络为实际研究对象,通过针对信息传输信道质量实时感知和有效监测的方法,在保持链路连通状态下自适应调整传感器网络的信息传输信道参数,减少掉线重连概率,实现了网络吞吐量最大化。实验表明,本文算法能有效结合上述两类方法的优点,既能有效评估信道质量,又能较快跟踪信道状态变化,有效保障了野外布设的传感器网络信道时变和干扰背景下数据传输的实时性与可靠性。

2 信道质量感知与监测

本文主要有两个方面的内容,分别是信道质量感知与监测和传输参数自适应调整。信道质量实时感知通过对信道的信噪比估计获取,信道质量监测则根据周期内加权滑窗平均信噪比估计结果得到。为了对当前信道的信噪比进行估计,得到信道质量的瞬时状态,信道需维持正常链接所需的信号电平,因此,本文在数据空白期引入虚拟数据包均衡信息传输数据流,信道质量感知与监测流程如下所示:

(1) 通信双方初置定时器 T_1 和 T_2 ($nT_1 = T_2$),并在 T_1 定时器中断时,启动信噪比估计算法,将估计结果按时间序列记为 $\lambda(1), \lambda(2), \dots, \lambda(n)$;

(2) 在收到定时器 T_2 第 m 次中断后,判断下一周期(第 $m+1$ 次)数据包传输密度 $\rho(m+1)$,其中 $\rho(m+1) = N/T_2$, N 为当前等待发送数据包个数;

(3) 当 $\rho(m+1) < \rho_{th}$ 时,在数据包内插入虚拟帧,其中 ρ_{th} 为经验值;

(4) 由式 $\Gamma_q(m) = \alpha \times \lambda(n) + (1-\alpha) \times \sum_{i=1}^n \beta_i \lambda(n-i)$,计算得到当前信道质量 $\Gamma_q(m)$,在保持通信连接的情况下,根据相应结果启动信道传输参数自适应调整方法。

其中,信噪比估计是信道质量感知结果给出的重要组成部分,它提供了信道监测所需的信道质量信息。本文讨论的传感器节点之间通过壳状映射技术通信,是一种在多维有限 QAM 星座扩展中可实现近球体星座形状的算法。为了对该信息传输信道的信噪比进行估计,本文采用文献^[12]的方法,利用两个统计量(低阶)的比值,即 $z = E(r_k^2) / [E(|r_k|)]^2$,得到一种数据包传

输期间就可以准确进行的盲信噪比估计方法。具体过程如下:

对任何混有加性高斯白噪声的信号都可以表示为:

$$r_k = f \cdot x_k + n_k, k=1, 2, \dots, L \quad (1)$$

其中 x_k 是信息传输真实的信号, f 为衰减因子。 f 在 T_1 时间段内是未知的固定常量。 n_k 是均值为零的复高斯白噪声, 其实部和虚部的方差都为 σ^2 , L 为用于估计的采集样本点数, 即 T_1 时间段信噪比估计算法采样点数。由于 QAM 星座中各个星座点的发射概率相同, 因此落在实轴和虚轴上各幅度值的概率也是已知的^[4]。等价于:

$$r_{k,I/Q} = \pm \alpha_{k,I/Q} A_{\max} + n_{k,I/Q} \quad (2)$$

这里取正负符号的概率分别是 0.5, 信号与噪声的下标 I 表示同相部分(实部), 下标 Q 表示虚部正交部分(虚部); A_{\max} 为终端的接收时真实 QAM 信号实部和虚部的最大幅度值, 其中包括了固定的衰减因子 f , $\alpha_{k,I/Q}$ 表示接收幅值相对于最大幅值的比例系数, 设 $\alpha_{k,I/Q}$ 对应的概率取值在向量 β 中, 而其取值在向量 α 中而。由于 QAM 信号的星座是对称特性, 其信号同相部分和正交部分的平均功率相等, 于是可得到:

$$\text{SNR} = P_{\text{QAM},I/Q} / \sigma^2 = \lambda \quad (3)$$

其中 $P_{\text{QAM},I/Q}$ 可以通过和 α , β 和 A_{\max} 来表示

$$P_{\text{QAM},I/Q} = E(|f x_k|^2) = SQ(\alpha) \beta^T A_{\max}^2 = \gamma A_{\max}^2 \quad (4)$$

这里运算符 SQ 表示当 $\delta = [\eta_1, \eta_2 \dots \eta_N]$ 时, $SQ(\delta) = [\eta_1^2, \eta_2^2 \dots \eta_N^2]$, 符号 $\gamma = SQ(\alpha) \beta^T$, N 为 α 的长度。对于本文信息传输的 QAM 信号的向量 α 、 β 值以及计算出得 γ 值分别列出。 $\alpha = [1/5, 3/5, 1]$, $\beta = [3/8, 3/8, 2/8]$, $\gamma = 2/5$ 。同时考虑 $r_{k,I/Q}$ 平方的均值和 $r_{k,I/Q}$ 绝对值的均值, 得到

$$E(r_{k,I/Q}^2) = P_{\text{QAM},I/Q} + \sigma^2 \quad (5)$$

$$E(|r_{k,I/Q}|) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{SQ(\alpha) A_{\max}^2}{2\sigma^2}} \beta^T + [\alpha A_{\max} \otimes$$

$$\text{erf}\left(\alpha \sqrt{\frac{A_{\max}^2}{2\sigma^2}}\right)] \beta^T \quad (6)$$

其中 \otimes 表示数组乘, 即当 $\varepsilon = [\zeta_1, \zeta_2 \dots \zeta_N]$, $\delta = [\eta_1, \eta_2 \dots \eta_N]$ 时 $\delta \otimes \varepsilon = [\eta_1 \zeta_1, \eta_2 \zeta_2, \dots, \eta_N \zeta_N]$; 根据(5)和(6)得到

$$\frac{E(r_k^2)}{[E(|r_k|)]^2} = \frac{1 + P_{\text{QAM}}/\theta^2}{\left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{SQ(\alpha) A_{\max}^2}{2\sigma^2}} \beta^T + [\alpha \sqrt{\frac{A_{\max}}{\sigma}} \otimes \text{erf}\left(\alpha \sqrt{\frac{A_{\max}^2}{2\sigma^2}}\right)] \beta^T \right\}^2} \quad (7)$$

将式(3)和式(4)代入式(7)并令 $z = E(r_k^2) / [E(|r_k|)]^2$, 得 $z = f(\lambda)$

$$= \frac{1 + \lambda}{\left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{SQ(\alpha)\lambda}{2\gamma}} \beta^T + [\alpha \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}} \otimes \text{erf}\left(\alpha \sqrt{\frac{\lambda}{2\gamma}}\right)] \beta^T \right\}^2} \quad (8)$$

因此, 通过 r_k 平方的均值和 r_k 绝对值的均值的计算即可得到函数 $f(\lambda)$ 的值, 而且这两个计算都为统计计算。由此给出了一个估计信噪比 λ 的方法, 即 $\lambda = g(z)$, 其中 $g(z) = f^{-1}(\cdot)$, 那么 $\lambda = 10 \log [g(z)]$, 单位取 dB。为了在实际工程应用中简化运算过程, 还可以通过数据拟合的方法, 用一个三阶 $\lambda = C_3 z^3 + C_2 z^2 + C_1 z + C_0$ 多项式近似估计结果。

3 信道传输参数自适应调整过程

在实际系统中, 只有充分精确的估计系统的状态, 才能保证系统在最佳方式下运行。如果系统受到随机噪声的干扰, 可通过测量系统输入输出数据, 采用数理统计的方法对系统不可观测的状态进行估计, 利用卡尔曼滤波原理, 每当要进行一次新的量测时, 只需知道这一时刻的状态滤波值 \mathbf{x}_k 和滤波误差矩阵 \mathbf{P}_k , 就可算出这下一时刻的状态滤波值 \mathbf{x}_{k+1} 和滤波误差矩阵 \mathbf{P}_k , 如此反复推理下去又可算出下下次的值。由此可看出, 只要知道系统的初始状态值 \mathbf{x}_0 和滤波误差矩阵 \mathbf{P}_0 , 即可根据递推公式准确的估计出系统的状态。因此本文首次提出根据卡尔曼滤波原理, 建立离散化的传输参数自适应调整模型, 其方法从物理意义上来说, 等效于加大了时间波门, 计算得到的参数值显然更符合信道实际状况。

信道传输参数自适应调整方法通过建立信道参数变化运动模型来实现, 设 $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{s}_{k-1}$, $\mathbf{x}_k = \{b_k, w_k\}$, b_k 表示波特率, w_k 表示传输功率, 以及信道参数观测模型 $\mathbf{y}_k = \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$, 根据上次使用的参数值 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 和本次通信双方握手训练得到的参数值 \mathbf{y}_k 平滑滤波得到当前信道参数使用值作为本次连接使用。模型中 \mathbf{x}_k 为信道当前第 k 次传输参数的估计值, \mathbf{s}_k 为状态噪声, \mathbf{y}_k 为当前第 k 次连接握手训练得到的速率观测值, \mathbf{v}_k 为观测噪声。传输参数自适应调整方法通过如下步骤完成。

步骤一: 初始化各参数值, 设定含噪估计协方差 $\mathbf{P}_0 = \mathbf{I}$, 信噪比估计时运动噪声协方差 $\mathbf{Q} = (0.0001, 0.01)^T$, 观测噪声协方差 $\mathbf{R} = (0.01, 0.01)^T$;

步骤二: 更新估计协方差 $\mathbf{P}'_k = \mathbf{F}(k) \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}^H(k) +$

$$\mathbf{Q}, \mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 + c\hat{\Gamma}(k)/w_k \end{bmatrix}, \text{其中, } c \text{ 是预设的常}$$

数;

步骤三: 计算新息增益 $\mathbf{H}_k = \mathbf{P}'_k \mathbf{C}^H [\mathbf{C} \mathbf{P}'_k \mathbf{C}^H + \mathbf{R}]^{-1}$, 其中 $\mathbf{C} = [1 \ 0]$;

步骤四: 计算当前第 k 次信道传输参数最优估计值 $\hat{\Gamma}(k)$, $\hat{\Gamma}(k) = \mathbf{F}(k) \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{H}_k [\mathbf{y}_k - \mathbf{C} \mathbf{F}(k) \cdot \hat{\Gamma}(k-1)]$ 。

步骤五: 计算含噪估计协方差 $\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{F}^{-1}(k) \mathbf{H}_k \mathbf{C}] \mathbf{P}'_k$;

步骤六: 由步骤四中得到 $\hat{\Gamma}(k)$ 中的 \hat{b}_k 分量计算得到实际使用的速率标称值 $\mathbf{V} = \lfloor \hat{b}_k \times \nu \rfloor$ 作为连接使用速率, w_k 标称值 $\mathbf{W} = \lfloor \hat{w}_k \times w \rfloor$ 选择传输功率, 其中 ν, w 为基本符号速率与功率, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取小于内部运算结果的最接近标称值。

4 性能实测

为了验证本文所提传输参数自适应调整算法的优劣,在仿真时将其与未采用任何技术控制的信息传输方式进行性能对比。首先,在不同的平均信噪比下,对掉线概率作比较。令两系统都自行运作 20 个小时,在同等条件下随机加扰,建立平均 SNR 为 $\lambda \in [16, 36]$, 方差 $\sigma^2 = 1$ 的模拟野外通讯环境,统计实验时间段内平均信噪比和掉线次数的大小,绘制图 1。从该图可看出,在平均信噪比较小时,未使用本文算法的信道掉线次数比使用了本文算法的掉线次数高十倍以上。随信道信噪比的增加,两者掉线次数都有所下降,但至少相差十次左右。因此,未使用本文算法的信道对噪声的自适应能力较差,频繁掉线将导致传感器网络大量的采集数据缺失。

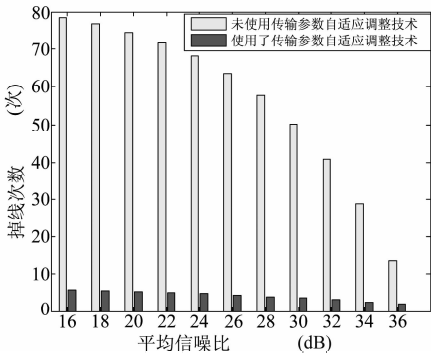


图 1 平均信噪比——掉线次数曲线

Fig. 1 The mean of SNR-The times of outage

其次,分析该模拟环境下两者的吞吐量,如图 2 所示。无论信道质量优劣,未使用传输参数自适应调整

算法的节点其信道吞吐量始终小于使用了传输参数自适应调整算法的信道。这是因为未使用本文算法的节点信道会因为掉线而中断传输较长时间或者由于第一次握手时信道较差便始终低速传输,浪费系统的资源。与此不同,使用了本文算法的节点当信道在质量较差时,为适用环境自适应降速,保持链路连通,在信道质量恢复时,经过调整参数,增加速率,实现了带宽的有效利用,而且较小的中断传输的次数使得数据传输的整体吞吐量也得到一定的提升。由此可见,本文算法既能保障信息传输的可靠性,又能保障传感器网络信息汇聚的的实时性。

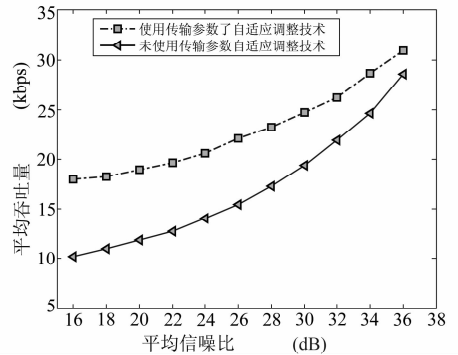


图 2 平均信噪比——平均吞吐量曲线

Fig. 2 The mean of SNR-The mean of throughput

5 结束语

本文主要探讨了预警系统中广域部署在偏远地区的传感器网络,采用话音线路传输带来的新问题及其解决方案,提出了一种基于信道感知与监测的传感器网络自适应参数调整方法。首先,通过在数据包传输期间就可以准确进行的盲信噪比估计方法,对信道质量进行实时感知,然后利用感知结果对信道质量周期监测,并据此建立离散化的传输参数自适应调整模型。虽然这一方法在两大步骤中都涉及到较为复杂的运算,但由于其在大型传感器节点实现,其处理速度可以完全满足信道参数变化的实时性要求,因此本文算法具有较大实用价值。最后通过实际测试,证明了本文算法在野外布设传感器网络中,能够显著提高数据传输的服务质量,相对于未采用任何技术控制的信息传输方式具有相当大的优越性。

参考文献

[1] 郭尊华,谢维信,黄敬雄. 传感器网络有线接入信息传输性能分析[J]. 深圳大学学报(理工版). 2010(1): 1-5.

GUO Zun-hua, XIE Wei-xin, HUANG Jing-xiong, Performance analysis of sensors transmitting data with wired

- access scheme [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2010(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 刘宗香, 谢维信, 黄敬雄, 等. 被动传感器网基于修正 Riccati 方程的系统优化设计 [J]. 信号处理. 2008 (5): 733-736.
LIU Zong-xiang, XIE Wei-xin, HUANG Jing-xiong, et al. System optimization design for passive sensor network based on the modified Riccati equation [J]. Signal Processing, 2008, 24 (5): 733-736. (in Chinese)
- [3] Balachandran K, Kadaba S R, Nanda S. Channel quality estimation and rate adaptation for cellular mobile radio [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on. 1999, 17(7): 1244-1256.
- [4] Pauluzzi D R, Beaulieu N C. A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel [J]. Communications, IEEE Transactions on. 2000, 48(10): 1681-1691.
- [5] 范海波, 陈军. AWGN 信道中非恒包络信号 SNR 估计算法 [J]. 电子学报. 2002, 30(009): 1369-1371.
FAN Hai B, CHEN Ju CAO, Zhi Gang An Algorithm of SNR Estimation for Non-Constant Envelope Signal in the AWGN Channel [J] Acta Electronica Sinica. 2002, 30 (009): 1369-1371. (in Chinese)
- [6] Jacobsmeyer J M. Adaptive trellis-coded modulation for band limited meteor burst channels [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on. 1992, 10(3): 550-561.
- [7] Kamerman A, Monteban L. WaveLAN(R)-II; a high-performance wireless LAN for the unlicensed band [J]. Bell Labs technical journal. 1997, 2(3): 118-133.
- [8] Lacage M, Manshaei M H, Turetli T. IEEE 802. 11 rate adaptation: a practical approach [Z]. Association for Computing Machinery, Inc, One Astor Plaza, 1515 Broadway, New York, NY, 10036-5701, USA, 2004.
- [9] Yee M S, Hanzo L. A wide-band radial basis function decision feedback equalizer-assisted burst-by-burst adaptive modem [J]. Communications, IEEE Transactions on. 2002, 50(5): 693-697.
- [10] Camp J, Knightly E. Modulation rate adaptation in urban and vehicular environments: cross-layer implementation and experimental evaluation [J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on. 2010, 18(6): 1949-1962.
- [11] Chun-Cheng C, Haiyun L, Eunsoo S, et al. Rate-Adaptive Framing for Interfered Wireless Networks: INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE [Z]. 2007: 1325-1333.
- [12] 许华, 樊龙飞, 郑辉. 一种 QAM 信号的盲信噪比估计算法 [J]. 电子学报. 2005(4): 758-761.
Xu Hua, Fan Long-Fei, Zhen Hui. A Blind SNR Estimation Algorithm for QAM Signals [J] Acta Electronica Sinica. 2005(4): 758-761. (in Chinese)

作者简介



罗成 (1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为传感器网络、通信与组网等。E-mail: luocheng1@email.szu.edu.cn



谢维信 (1941-), 男, 教授, 博士生导师, 现为深圳大学信号与信息处理学科学术带头人, 国家级有突出贡献中青年专家, 主要研究方向为智能信息处理、模糊信息处理等。



喻建平 (1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为传感器网络、通信与组网、密码学信息安全等。